

Вальцев Н.В., Рыжков А.Ф.

ВЫБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ВНЕШНЕГО СЖИГАНИЯ

Аннотация. Разработка парогазовых установок (ПГУ) на угле остается перспективным направлением развития энергетики, в частности, их создание предусмотрено Энергетической стратегией России до 2030 г. Авторами разрабатывается высокотемпературный рекуперативный воздухонагреватель, работающий на угле, для ПГУ мощностью 500 МВт с внутрицикловой газификацией. В статье рассматриваются различные жаропрочные материалы, пригодные для изготовления воздухонагревателя. Произведено сравнение отечественных и иностранных жаропрочных сплавов, по результатам которого выявлено, что расчетная прочность отечественных сплавов после 10^5 часов работы выше. Таким образом, нагрев воздуха с давлением 2 МПа с использованием никелевых супер-сплавов может быть произведен до температуры 900-950°C.

Ключевые слова: угольные парогазовые установки, жаропрочные материалы, никелевые сплавы.

Abstract. The development of coal combined-cycle plants remains a promising direction of energy development, in particular, it is provided by the Energy strategy of Russia for the period up to 2030. The authors are developing a high-temperature recuperative air heater, operating on coal, for a 500 MW IGCC. The article considers the various possible materials to create high temperature air heater. The comparison of domestic and foreign heat resistant alloys was made and it was found that domestic ones have higher calculated strength after 10^5 hours. So using nickel-based super-alloys the compressed air with a pressure of 2 MPa can be heated up to 900-950°C.

Keywords: coal combined-cycle plants, heat resistant materials, nickel-based alloys.

Высокотемпературные теплообменники необходимы в различных энергетических технологиях для обеспечения их высокой эффективности. Под высокотемпературными обычно понимаются теплообменники, работающие при температурах свыше 650°C. В настоящее время их разработка ведется применительно к следующим основным областям использования:

- 1) Газотурбинные установки с непрямым нагревом рабочего тела:
 - на основе внешнего сжигания;
 - с высокотемпературными ядерными реакторами;
 - использующие концентрированную солнечную энергию.
- 2) Циклы тепловых двигателей с рекуперацией тепла.
- 3) Паросиловые циклы на продвинутые ультрасверхкритические параметры.
- 4) Высокотемпературные топливные элементы.

5) Системы подогрева окислителя и утилизации теплоты уходящих газов в металлургической, химической и других отраслях промышленности.

Высокие температуры и зачастую сложные условия эксплуатации предъявляют повышенные требования к используемым в подобных теплообменных аппаратах материалам, поэтому вопрос их выбора становится одним из ключевых, в том числе и для всей энергоустановки, во многом определяя ее конфигурацию и рабочие параметры. В данной работе рассматриваются материалы, которые могут быть использованы для создания высокотемпературного нагревателя циклового воздуха на основе внешнего сжигания угля для парогазовой установки (ПГУ) с внутрицикловой газификацией.

Основной сложностью для твердотопливных ПГУ является обеспечение чистоты рабочего тела, требуемой по условиям надежной работы газовой турбины. В силу недостаточной проработанности методов эффективной горячей газоочистки не получили распространения технологии сжигания твердого топлива под давлением с подачей продуктов сгорания непосредственно в газовую турбину, а ПГУ с внутрицикловой газификацией вынуждены использовать низкотемпературные технологии очистки синтез-газа перед подачей его в камеру сгорания газовой турбины, что заметно увеличивает стоимость установки и снижает ее КПД. Кроме того, наличие развитого острова газификации не только снижает надежность работы ПГУ, но и приводит к заметному снижению соотношения мощностей газовой и паровой турбины по сравнению с ПГУ на природном газе, а, следовательно, и снижению КПД установки в целом, из-за появления значительных потоков теплоты с паром непосредственно в нижний паротурбинный цикл.

Основное преимущество высокотемпературных теплообменников с внешним сжиганием в твердотопливных газотурбинных и парогазовых установках – возможность использовать для нагрева дешевые низкосортные топлива по отработанным технологиям полного сжигания с сохранением при этом чистоты рабочего тела (обычно воздуха). Для достижения максимальной эффективности требуется обеспечить высокую температуру нагрева – таким образом, выбор материалов становится критически важным вопросом. В рассматриваемой схеме парогазовой установки с внутрицикловой газификацией [1] в теплообменнике должен осуществляться нагрев воздуха с давлением ≈ 2 МПа за счет сжигания угля, расчетный срок службы аппарата – 10^5 часов. В связи с высокой производительностью аппарата (расход воздуха 500 кг/с) он проектируется по типу пылеугольного энергетического котла.

Нагрев воздуха до высоких температур может быть обеспечен только в керамических теплообменниках, которые имеют ряд преимуществ перед металлическими, основные:

- высокие рабочие температуры;
- высокая стойкость к коррозии и эрозионному износу.

Однако им присущи и значительные технологические недостатки, препятствующие их массовому применению:

- высокая стоимость керамических труб и сложность получения длинных труб с одинаковой структурой и свойствами;
- сложность герметичного соединения отдельных элементов;
- хрупкость.

На основании данных [2] для высокотемпературных теплообменников газотурбинных установок внешнего сжигания наиболее подходящей является керамика на основе карбида кремния (Таблица 1).

Таблица 1 – Пригодность керамических конструкционных материалов для высокотемпературных теплообменников

	Оксид алюминия Al_2O_3	Нитрид кремния Si_3N_4		Карбид кремния SiC	
		RBSiN	SSiN	SSiC	SiSiC
Высокотемпературная прочность	+	(–)	+	+	(–)
Теплопроводность	(–)	(–)	(–)	+	+
Усталостная прочность	–	+	+	+	+
Устойчивость к окислительной атмосфере при высокой температуре	+	–	(–)	+	+
Пористость/Газоплотность	–	–	+	+	+
+ – годен; (–) – ограниченно годен; – – непригоден					

Однако, основные типы керамики оказались неустойчивы к коррозии со стороны жидкого шлака, поэтому нагревать воздух в них при работе на твердом топливе возможно до $\sim 1200^\circ C$, если будут решены присущие им проблемы. Тем не менее, применение данных материалов может рассматриваться в качестве модернизационного задела на перспективу.

Для изготовления металлических высокотемпературных теплообменников необходимо применять никелевые сплавы. За рубежом несколько последних десятилетий в рамках программ по развитию

перспективных энергетических технологий осуществлялись в том числе и материаловедческие исследования применительно к высокотемпературным процессам, в первую очередь для:

- угольных паротурбинных энергоблоков на продвинутые ультрасверхкритические параметры;
- высокотемпературных ядерных реакторов;
- твердотопливных установок на базе внешнего сжигания.

Основные рассматривавшиеся сплавы [3,4,5,6] приведены в Таблице 2.

Таблица 2 – Сплавы, планируемые к использованию в высокотемпературных энергетических теплообменниках

Сплав	Применение
IN617 (CCA617)	Пароперегреватели, паропроводы А-USC (700-760°C, 35 МПа, 10 ⁵ ч) Промежуточные теплообменники ВТГР (до 950°C, до 5-7 МПа, 2·10 ⁵ ч)
Haynes 230	Пароперегреватели, паропроводы А-USC (700-760°C, 35 МПа, 10 ⁵ ч) Промежуточные теплообменники ВТГР (до 950°C, до 5-7 МПа, 2·10 ⁵ ч)
IN740	Пароперегреватели, паропроводы А-USC (700-760°C, 35 МПа, 10 ⁵ ч)
800H	Промежуточные теплообменники ВТГР (до 950°C, до 5-7 МПа, 2·10 ⁵ ч)
Hastelloy X	Промежуточные теплообменники ВТГР (до 950°C, до 5-7 МПа, 2·10 ⁵ ч)
XH55MBЦ	Промежуточные теплообменники ВТГР (до 950°C, до 5-7 МПа, 2·10 ⁵ ч)
MA956	Поверхности нагрева высокотемпературной воздушной топки установок HiPPS (до 1100°C, 2 МПа, 10 ⁵ ч)

Перспективными являются дисперсионно-упрочненные оксидами сплавы, например, оксидом иттрия, которые могут работать до 1100-1150°C, однако не решена проблема надежного соединения отдельных элементов из них между собой, кроме того их стоимость остается очень высокой [7].

Имеющиеся жаропрочные сплавы предназначены в основном для изготовления различных деталей газовых турбин, имеющих значительно меньший расчетный срок службы, по сравнению с котельным оборудованием.

В связи с тем, что данных по пределу ползучести сплавов при высокой температуре и базе испытаний в 10^5 ч в литературе мало, будем опираться на расчетные значения предела длительной прочности, определяемые на основании известной зависимости между временем до разрушения при постоянной температуре τ_p и напряжением σ :

$$\tau_t = B\sigma^{-m}$$

Минимальный необходимый предел длительной прочности определяется на основании условия, что после 10^5 ч работы материал должен иметь прочность в 3 раза выше рабочего давления, а при расчете номинальных допускаемых напряжений значения предела длительной прочности берутся с коэффициентом 2/3:

$$\sigma_{10^5/t}^{\min} = 3 \cdot P \cdot 1,5$$

и при давлении воздуха 2 МПа составит $3 \cdot 2 \cdot 1,5 = 9$ МПа.

Результаты расчетов предела длительной прочности представлены на Рисунке 1.

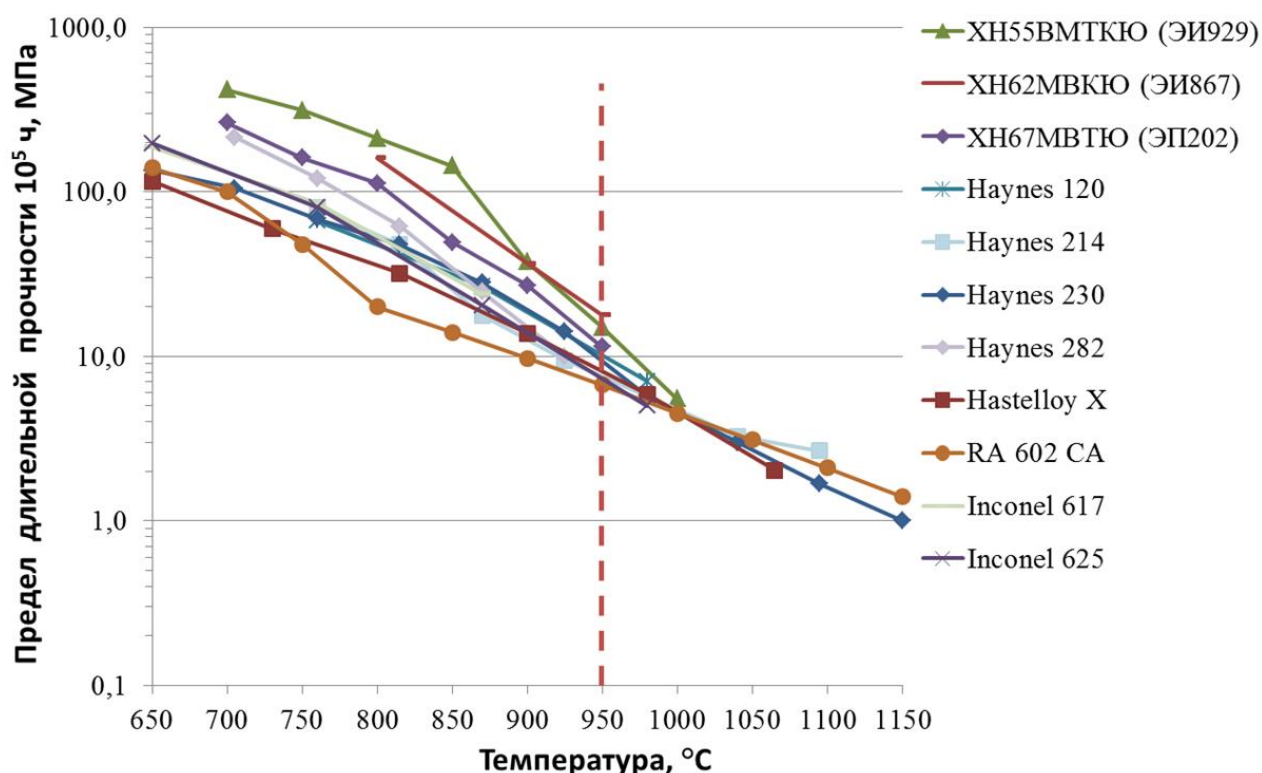


Рисунок 1 – Зависимость предела длительной прочности от температуры для жаропрочных сплавов с расчетной базой 10^5 ч

Проведенное сравнение свойств отечественных и иностранных сплавов показало, что отечественные сплавы по жаропрочности несколько превосходят зарубежные аналоги. Таким образом, использование жаропрочных никелевых сплавов типа ЭИ929 и ЭИ867 позволяет обеспечить нагрев компримированного воздуха до 900-950°C.

Несмотря на наличие большого количества доступных жаропрочных сплавов для использования большинства из них в высокотемпературных теплообменниках все еще требуется проведение дополнительных материаловедческих исследований по подтверждению механических свойств на базе 10^5 часов работы и определению коррозионной стойкости в среде продуктов сгорания, водяного пара сверхвысоких параметров и т.п. Кроме того, серьезным фактором, ограничивающим их использование, является их высокая стоимость. По данным [8] стоимость сплава типа IN617 или IN740 варьируется в диапазоне 55-110 \$ за кг. Оценочная стоимость отечественных сталей и сплавов, возможных к использованию в высокотемпературном воздухонагревателе приведена на Рисунке 2.

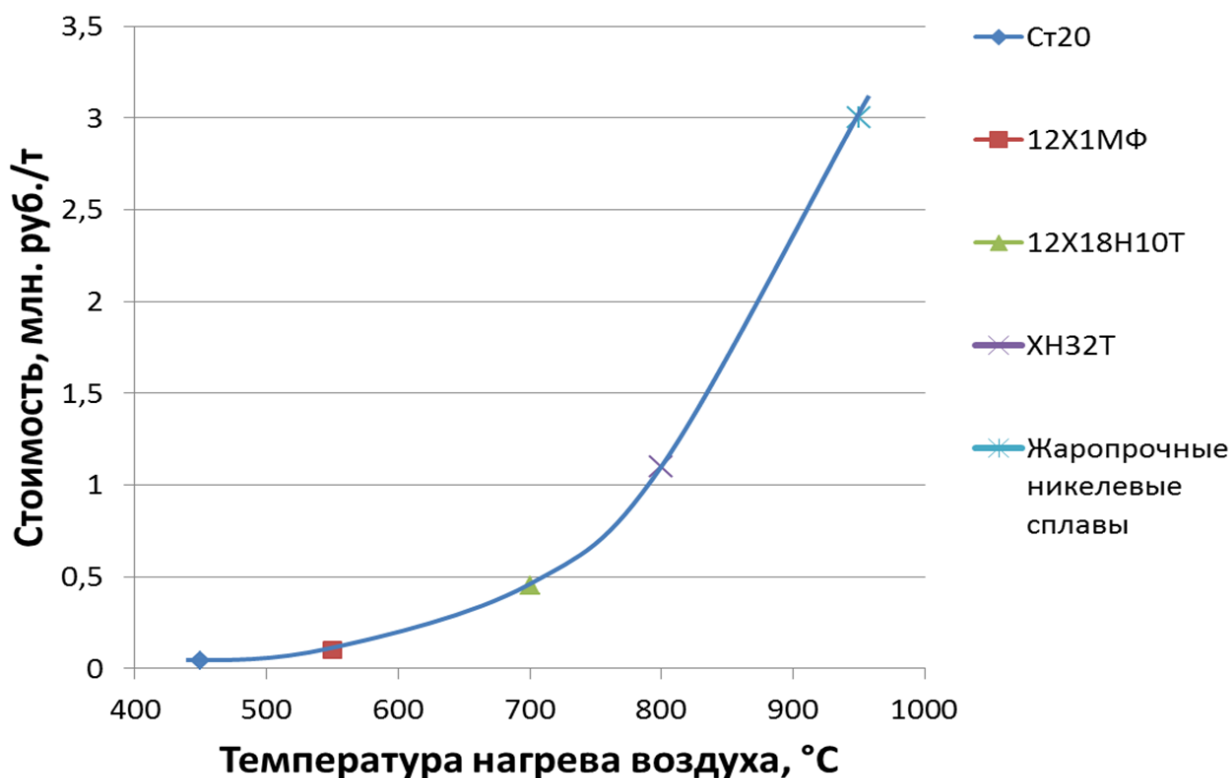


Рисунок 2 – Оценочная стоимость сталей и сплавов в зависимости от возможной температуры нагрева воздуха

Для снижения коррозионного и эрозионного воздействия продуктов сгорания угля на поверхности нагрева воздухонагревателя целесообразно предусмотреть их защиту с помощью покрытий. Это не только повысит надежность эксплуатации агрегата, но и может позволить уменьшить толщину стенки труб, за счет сокращения прибавки на износ к расчетной толщине стенки, а значит, и снизить общую стоимость. Для этого предлагается использовать широко применяемый, например, в буровом машиностроении, метод цементации.

В настоящее время выполняются лабораторные исследования по проверке повышения износостойкости никелевых сплавов после цементации в твердом карбюризаторе на примере трубных образцов из сплава ХН60ВТ.

Библиографический список

1. Гибридные ПГУ на твердом топливе / Т. Ф. Богатова [и др.] // Энергетик. – 2014. – № 12. – С. 12–16.
2. Spliethoff H. Power Generation from Solid Fuels / H. Spliethoff. – Berlin : Springer-Verlag, 2010. – 672 p.
3. Aquaro D. High temperature heat exchangers for power plants: Performance of advanced metallic recuperators / D. Aquaro, M. Pieve // Applied Thermal Engineering. – 2007. – Vol. 27, I. 2/3. – P. 389–400.
4. Zhang D. Ultra-Supercritical Coal Power Plants: Materials, Technologies and Optimisation / D. Zhang. – Abington : Woodhead Publishing Ltd, 2013. – Pt. 41. – 282 p.
5. Status Report on Structural Materials for Advanced Nuclear Systems [Electronic resource] / Nuclear Energy Agency. – [S. l.] : OECD, 2013. – № 6409. – 111 p. – Mode of access: http://www.keepeek.com/Digital-Asset-Management/oecd/nuclear-energy/status-report-on-structural-materials-for-advanced-nuclear-systems_9789264208551-en#.WiofbXlPIU#page1.
6. Машиностроение : энциклопедия : в 40 т. Разд. 4. Расчет и конструирование машин. Т. 4-25 : Машиностроение ядерной техники : в 2 кн.. Кн. 1 / Е. О. Адамов[и др.] ; ред. т. Е. О. Адамов. – Москва : Машиностроение, 2005. – 960 с.
7. Power plant life management and performance improvement / Ed. J. Oakey. – [S. l.] : Woodhead Publishing Ltd, 2011. – 704 p.
8. U.S. program on advanced ultrasupercritical power plant materials – the economy of using advanced alloys / J. Shingledecker [et al.] // IEA Clean Coal Centre Workshop: Advanced ultrasupercritical coal-fired power plants (Vienna, Sep 19–20 2012). – Vienna, 2012. – P. 18–28.